中国生态农业学报 2016 年 12 月 第 24 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2016, 24(12): 1614−1622

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160489

轻度盐碱地玉米专用肥缓效氮不同添加比例的研究*

王永亮[1,2] 王 琦[1,2,3] 杨治平[1,2**] 郭军玲[1,2] 郭彩霞[1,2]

(1. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所 太原 030031; 2. 土壤环境与养分资源山西省重点实验室 太原 030031; 3. 山西大学生物工程学院 太原 030006)

摘 要 针对山西省晋北区域盐碱耕地玉米生产中存在肥料施用针对性不强的问题，本试验利用已有的山西省晋北区域盐碱地玉米缓释专用肥配方，探索适合该区域玉米生产的缓效氮和速效氮适当配比，并在春玉米生产中验证其肥效。试验设不施氮肥(CK)、100%速效氮、25%缓效氮、33%缓效氮、50%缓效氮、67%缓效氮、75%缓效氮和 100%缓效氮 8 个处理，分别测定各处理玉米产量、各生育时期干物质量、植株吸氮量、氮素转运及利用以及收获后对土壤硝态氮积累量的影响。结果表明，随着缓效氮添加比例的增加，玉米各生育时期分析指标均呈现先增加后减小的波动性变化，其中添加 33%缓效氮处理为最大波峰处。添加缓效氮 33%较 100%速效氮处理能够有效增加玉米产量、地上部干物质积累量和吸氮量，提高玉米对氮素的利用，获得最高产量(14 897.46 kg·hm^{-2})，比 100%速效氮处理增产 42.23%；同时添加 33%缓效氮处理产量构成因素优于其他处理，和 100%速效氮处理相比，穗长、穗粒数、穗直径和百粒重分别提高 55.34%、39.30%、53.57%和 52.57%，平均秃尖缩短 0.38 cm；玉米成熟期地上部干物质积累量和吸氮量最大，分别为 26 787.53 kg·hm^{-2} 和 239.72 kg·hm^{-2}；该处理的氮肥利用率、氮肥偏生产力及氮肥农学效率均最大，分别为 39.79%、66.20 kg·kg^{-1} 和 47.03 kg·kg^{-1}。添加 33%缓效氮处理玉米叶氮转运率和茎氮转运率分别为 76.08%和 49.39%，氮转移率为 67.76%、氮收获指数为 77.40%，显著高于 100%速效氮处理。添加缓效氮有效改善了各土层土壤硝态氮的积累量，其中缓效氮添加比例为 33%处理各土层硝态氮积累量均匀，深层土壤淋溶最小。可见，在山西晋北区域盐碱耕地春玉米生产中，在已有配方中选择添加 33%缓效氮能达到玉米增产增效、保护环境的效果，在该地区玉米生产中应用前景广阔。

关键词 春玉米 缓效氮 氮肥配比 氮素利用率 硝态氮
中图分类号: S14-33; S143.1+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)12-1614-09

Analysis of slow-release nitrogen fraction in maize specialized fertilizer for mild-saline alkaline soils*

WANG Yongliang[1,2], WANG Qi[1,2,3], YANG Zhiping[1,2**], GUO Junling[1,2], GUO Caixia[1,2]

(1. Institute of Agricultural Environment & Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources in Shanxi Province, Taiyuan 030031, China; 3. College of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract Currently, the fertilization of maize is not pertinent to actual local situations in northern Shanxi. To solve this problem, a maize specialized fertilizer formula for mild-saline-alkaline soils in northern Shanxi was studied to explore the

---

* 国家国际科技合作专项项目(2015DFA90990)、山西省科技攻关项目(20140311002-3)、山西省农业科学院博士基金项目(YBSJJ1309)和山西省国际科技合作项目(2014081036)资助
** 通讯作者：杨治平，主要从事作物高产养分资源高效研究。E-mail: yzpsx0208@163.com
王永亮，主要从事缓释肥研制研究。E-mail: yongliang_wang@126.com
收稿日期：2016−05−30 接受日期：2016−09−24

* The study was supported by the International Science and Technology Cooperation Program of China (2015DFA90990), the Science and Technology Project of Shanxi Province (20140311002-3), the Doctoral Fund of Shanxi Academy of Agricultural Sciences (YBSJJ1309), and the International Science and Technology Cooperation Project of Shanxi Province (2014081036).
** Corresponding author, E-mail: yzpsx0208@163.com
Received May 30, 2016; accepted Sep. 24, 2016

proper ratio of slow-release nitrogen (SRN) and rapid-release nitrogen (RRN) in maize production in this region and the effectiveness of the formula validated for spring maize. The treatments were 100% RRN and 25%, 33%, 50%, 67%, 75% and 100% SRN, and no nitrogen application was the control. The grain production and dry matter weight at different growth stages, nitrogen uptake, transport and utilization of maize plant, as well as post-harvest nitrate nitrogen accumulation in soil were analyzed. The results showed that with increasing SRN ratio in the maize specialized fertilizer, physiological parameters of maize increased and then decreased at different growth stages. The peaked values of different indicators all occurred under the treatment with 33% SRN. The addition of 33% SRN effectively increased grain production, dry matter weight, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of maize, and with the highest yield of maize of 14 897.46 kg·hm^{-2}. The yield of maize increased by 42.23% compared with 100% RRN treatment. Meanwhile compared with 100% RRN, yield components such as ear length, ear grain number, diameter, 100-seed weight in 33% SRN treatment were higher by 55.34%, 39.30%, 53.57% and 52.57%, respectively. Moreover, in the same treatment, the length of bald tip was shorten by 0.38 cm, while nitrogen use efficiency, nitrogen partial productivity and agronomic efficiency of nitrogen fertilizer were 39.79%, 66.20 kg·kg^{-1} and 47.03 kg·kg^{-1}, respectively; all of which were the highest in the treatments. The transport rate of nitrogen in different organs of maize was higher in 33% SRN treatment compared with 100% RRN treatment. Specifically, the rates of nitrogen transport in leaf and stem were respectively 76.08% and 49.39%, and the rate of nitrogen transfer and nitrogen harvest index were 67.76% and 77.40%, respectively; all of which were significantly higher than those in 100% RRN treatment. The 33% SRN treatment effectively improved nitrate nitrogen accumulation in the soil, which was different at different soil depths with the least in deep soil layers. It was therefore concluded that for spring maize cultivated in mild-saline-alkali soils in northern Shanxi, the addition of 33% of SRN to the existing maize specialized fertilizer increased maize production and fertilizer use efficiency, and protected the environment. This method was promising in enhancing the conditions (yield and environment) of maize production of the region.

Keywords　Spring maize; Slow-release nitrogen; Nitrogen fraction; Nitrogen use efficiency; Nitrate nitrogen

山西省的盐碱地面积有 30.13 万 hm^2，为土地总面积的 9.7%，其中有耕地 22.73 万 hm^2[1]。玉米(*Zea mays* L.)作为山西省主要粮食作物之一，为粮食增产作出了突出贡献。近 10 年来山西省统计年鉴数据显示, 2004 年到 2013 年这 10 年间，粮食增产主要依靠玉米总产的增加[2]，这一增加主要依靠玉米播种面积的增加，而肥料在粮食增产中所发挥的作用却很小，其中盐碱地作为耕地的的后备资源之一，起到了至关重要的作用。盐碱地作物生产中，受土壤环境的影响氮肥利用率低，进而影响植物的生长[3−4]，是制约盐碱地粮食生产的问题所在[5]。已有的研究表明，合理施用氮肥能改善盐碱地作物生长环境、提高作物产量[6]，同时，氮素还能提高植物抗盐能力，改善植物细胞渗透能力[7−10]，是作物提高产量的关键因素。近年来常规肥料对作物产量的贡献日趋减小，通过对新型缓释肥料的研究发现，相比速效氮肥，缓释肥的释放规律和玉米对氮素的吸收规律更加吻合[11]，施用缓释肥能提高玉米吸氮量和氮素利用率，并且减小肥料淋溶等对环境造成的危害[12−23]。王琦等[24]研究发现，硫包膜尿素的释放规律符合玉米氮素吸收规律，在盐碱土壤中施用能提高玉米产量、增加玉米吸氮量、降低土壤耕层 pH。但是，如果单纯施用缓释肥存在投入成本大，玉米前期养分供应不足等问题，而目前玉米生产中肥料施用存在不同区域缓释专用肥速效氮和缓效氮配比不明确、氮肥利用率低、玉米增产不增收等问题。

近年来，山西省农业科学院农业环境与资源研究所研发出一种玉米高氮缓释专用肥作为轻度盐碱耕地玉米高产高效施肥技术进行示范与推广，但该配方存在缓效氮成分添加比例大，生产成本高，农民经济负担偏重等问题。本研究在该专用肥已确定的氮、磷、钾配方基础上，重点研究其中缓效氮和速效氮的不同配比在轻度盐碱地玉米生产中的肥效及其对土壤环境的影响，旨在找出山西省晋北区域盐碱地玉米生产中缓释专用肥缓效氮和速效氮的适当配比。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验在山西省农业科学院应县试验基地进行。该区属暖温带半干旱大陆性气候，2015 年平均气温 9.3 ℃，年均降水量 322.6 mm，无霜期 144 d，年均相对湿度为 48%；供试土壤为轻度硫酸盐盐化土，容重为 1.38 g·cm^{-3}，0~20 cm 土层土壤 pH 为 8.75，有机质 13.24 g·kg^{-1}，全氮 0.788 g·kg^{-1}，硝态氮 13.42 mg·kg^{-1}，有效磷 8.12 mg·kg^{-1}，速效钾 146 mg·kg^{-1}。

1.2　试验方法

1.2.1　试验材料

供试作物为春玉米，品种为‘大丰 30’。供试肥料缓效氮源为硫包膜尿素(汉枫缓释肥料有限公司生

产)(N 37%)，速效氮源为普通尿素(N 46%)，磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 16%)，钾肥为硫酸钾(K_2O 50%)。

1.2.2 试验设计

试验采用单因子完全随机设计，小区面积为 60 m^2(长 10 m、宽 6 m)，12 行/区，行距 50 cm。2015 年 5 月 9 日播种，播种密度为 75 000 株·hm^{-2}，10 月 9 日收获。

将氮肥施用按缓效氮不同比例添加，试验共设 8 处理，分别为：不施氮肥(CK)；速效氮∶缓效氮=1∶0，即 100%速效，N(T_0)；速效氮∶缓效氮=3∶1，即 25%缓效氮(T_1)；速效氮∶缓效氮=2∶1，即 33%缓效氮(T_2)；速效氮∶缓效氮=1∶1，即 50%缓效氮(T_3)；速效氮∶缓效氮=1∶2，即 67%缓效氮(T_4)；速效氮∶缓效氮=1∶3，即 75%缓效氮(T_5)；速效氮∶缓效氮=1∶0，即 100%缓效氮(T_6)。根据试验区域现有玉米专用缓释肥施用量，各处理磷肥和钾肥施用量分别为 P_2O_5 75 kg·hm^{-2} 和 K_2O 45 kg·hm^{-2}，T_0~T_6 处理施氮量为 225 kg·hm^{-2}。各处理设 3 次重复，共 24 个小区，完全随机区组排列。所有肥料均一次性底施，灌水时期为播前、拔节期、灌浆期，灌水量分别为 6 m^3·60 m^{-2}、7 m^3·60 m^{-2}、6 m^3·60 m^{-2}。

1.2.3 测定项目与方法

1.2.3.1 植物样品

分别于出苗期(V3)、拨节期(V6)、大喇叭口期(V12)、吐丝期(R1)、乳熟期(R3)、生理成熟期(R6)取植物样品，选取每个小区长势一致具有代表性的 5 株取样，样品从植株茎基部整株取样，分叶、茎鞘、籽粒、穗轴等部分，放入烘箱，于 105 ℃下杀青 30 min，然后在 75 ℃下烘至恒重，称取各部位干重。粉碎混合均匀后用浓 H_2SO_4 消煮、凯氏定氮法测定样品的全氮含量。

收获同时进行测产，每小区连续取样 6 行，每行 10 m，测产样方面积为 30 m^2。在测产样方中取有代表性的玉米植株 5 株，考种统计穗长、穗直径、穗粒数和百粒重。

文中重要计算公式为：

氮肥偏生产力(PFPN, nitrogen partial productivity, kg·kg^{-1})=施氮区春玉米产量/施氮量[25] (1)

氮肥农学效率(AEN, agronomic efficiency of nitrogen fertilizer, kg·kg^{-1})=(施氮区春玉米产量−无氮区春玉米产量)/施氮量×100[25] (2)

氮肥利用率(REN, nitrogen use efficiency, %)=(施氮区春玉米地上部吸氮量−无氮区春玉米地上部吸氮量)/施氮量×100[25] (3)

氮素转运量(nitrogen transport capacity, kg·hm^{-2})=吐丝期各器官氮素积累量−成熟期相应器官氮素积累量[26] (4)

氮素转运率(nitrogen transport rate, %)=各器官氮素转运量/吐丝期各器官氮素积累量×100[26] (5)

转运氮贡献率(transport nitrogen contribution rate, %)=各器官氮素转运量/籽粒中氮积累量×100[27] (6)

氮收获指数(NHI, nitrogen harvest index, %)=籽粒中氮积累量/成熟期总氮积累量×100[27] (7)

氮转移量(nitrogen transfer, kg·hm^{-2})=植株开花期营养体氮素积累量−植株成熟期营养体氮素积累量[28−30] (8)

氮转移率(nitrogen transfer rate, %)=氮转移量/植株开花期营养体氮素积累量×100[28−30] (9)

氮素对籽粒贡献率(contribution rate of nitrogen to grain, %)=氮转移量/籽粒氮素积累量×100[28−30] (10)

1.2.3.2 土壤样品

播前进行土壤样品采集，自然烘干后过 2 mm 及 0.149 mm 筛，测定土壤容重、硝态氮、全氮、pH 值、有效磷和有效钾。

收获后每小区进行 5 点取样，取样深度分别为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~90 cm 共 4 层，自然烘干后过 2 mm 筛，应用全自动间断分析仪测定土壤硝态氮含量。并于收获后采用环刀分层取土的方法测定土壤容重，计算硝态氮累积量。计算公式为：

土壤剖面硝态氮累积量(kg·hm^{-2})=土壤硝态氮含量×土层厚度×土壤容重×10^{-1}[31] (11)

1.2.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel、Sigmaplot 12.5 以及 Minitab 15.0 软件进行统计分析，并进行多重比较(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同缓效氮添加比例对玉米产量及其构成因素的影响

从表 1 可以看出，8 个处理间产量及其构成因素差异显著，施肥处理产量显著高于不施肥处理，缓效氮肥与速效氮肥配合施用处理玉米产量优于单一肥料施用处理，T_6 优于 T_0。不同处理间玉米产量由高到低分别为：T_2>T_3>T_5>T_1>T_4>T_6>T_0>CK。增产效果最佳处理为 T_2，比 T_0 增产 42.23%，说明缓效氮和速效氮配施有助于玉米对养分的吸收利用，对玉米产量的形成优于单一肥料的施用效果。不同处理之

表 1　不同缓效氮添加比例对玉米产量及其构成因素的影响

Table 1　Effects of different proportions of slow-release nitrogen in maize specialized nitrogen fertilizer on yield and yield components of maize

处理 Treatment	穗长 Spike length (cm)	秃尖 Bald (cm)	穗粒数 Grains number per spike	穗直径 Spike diameter (mm)	百粒重 100-grain weight (g)	产量 Yield (kg·hm^{-2})	相比 T_0 增产 Increase production compared to T_0 (%)
CK	13.74±0.19a	2.86±0.16b	387.90±30.5a	35.43±0.68a	20.87±0.21a	4 312.64±338a	
T_0	17.51±1.52b	1.68±0.07a	444.29±7.85ab	54.03±3.99cd	25.00±2.46ab	10 472.46±576b	—
T_1	19.03±0.30bc	1.88±0.15a	591.33±13.2c	51.83±0.55bcd	28.57±0.41bcd	12 734.69±90.2bc	21.60
T_2	21.34±0.50c	1.30±0.15a	618.90±73.5c	54.40±0.91d	31.84±0.26de	14 897.46±714c	42.23
T_3	19.38±0.22bc	1.50±0.16a	627.11±24.8c	49.38±0.93bcd	31.90±1.21e	13 296.53±1 309bc	26.97
T_4	17.94±0.25bc	1.54±0.11a	597.05±14.4c	45.77±0.72b	26.97±0.36bc	11 750.24±141b	12.20
T_5	19.40±0.37bc	1.59±0.17a	626.44±15.6c	50.97±0.52bcd	29.76±0.35cd	13 158.18±479bc	25.65
T_6	18.52±0.23b	1.61±0.03a	570.22±21.1bc	47.14±1.1bc	26.61±0.47bc	11 261.15±143b	7.53

CK：不施氮肥；T_0：速效氮∶缓效氮=1∶0；T_1：速效氮∶缓效氮=3∶1；T_2：速效氮∶缓效氮=2∶1；T_3：速效氮∶缓效氮=1∶1；T_4：速效氮∶缓效氮=1∶2；T_5：速效氮∶缓效氮=1∶3；T_6：速效氮∶缓效氮=1∶0。同列不同小写字母表示 5%差异显著性。下同。CK: no N fertilization. T_0, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 and T_6 are treatments with ratios of available N to slow-release N of 1/0, 3/1, 2/1, 1/1, 1/2, 1/3 and 1/0. Different lowercase letters in the same column mean significant difference at 5%. The same below.

间穗长、秃尖、穗粒数、直径和百粒重等产量构成因素对差异较大，其中，施氮肥处理玉米产量构成因素和不施氮肥处理间在 $P<0.05$ 水平下差异显著；配施缓效氮各处理中以添加 T_2 为最佳，与 CK、T_0 和 T_6 相比，穗长分别高 55.31%、21.87%和 15.23%，穗粒数分别高 59.55%、39.30%和 8.54%，穗直径分别高 53.54%、0.68%和 15.40%，百粒重分别高 52.56%、27.36%和 19.65%，秃尖长分别短 1.56 cm、0.38 cm 和 0.31 cm。

2.2　不同缓效氮添加比例对玉米干物质积累量的影响

米干物质积累量是衡量作物生长状况、形成产量的前提条件。通过图 1 对不同处理玉米干物质积累量的分析可以看出，不同处理玉米干物质积累量均呈现“S”型变化，不施氮肥处理玉米各生育时期地上部干物质积累量变化幅度最小，且均显著低于施肥处理($P<0.05$)；在玉米营养生长期间，单施速效氮处理和配施缓效氮处理干物质积累量接近，在玉米生殖生长期间，单施速效氮处理干物质积累量与配施缓效氮处理之间差异逐渐增大。玉米生理成熟期，各处理干物质积累量从大到小分别为 $T_2>T_3>T_5>T_1>T_6>T_4>T_0>CK$，$T_2$ 比 CK、T_0 和 T_6 分别增加 15 043.23 kg·hm^{-2}、9 605.99 kg·hm^{-2} 和 3 556.18 kg·hm^{-2}。

2.3　不同缓效氮添加比例对玉米吸氮量的影响

氮素是玉米生长中需求量最大的营养元素，也是作物生长发育中必要的营养元素，同时氮素也是作物生长发育的限制因子之一[32]。通过图 2 对不同施肥处理玉米植株吸氮量的分析可以看出，玉米各

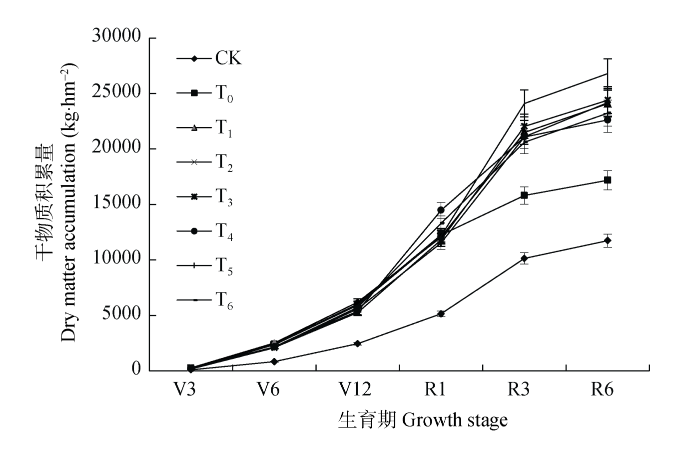


图 1　不同缓效氮添加比例对玉米地上部干物质积累量的影响

Fig. 1　Effects of different proportions of slow-release nitrogen in maize specialized nitrogen fertilizer on dry matter accumulation in maize

V3、V6、V12、R1、R3 和 R6 分别代表苗期、拔节期、大口期、吐丝期、乳熟期和完成期。下同。V3, V6, V12, R1, R3 and R6 represent seedling stage, jointing stage, huge-bell-bottom stage, silking stage, milking stage and mature stage. The same below.

生育时期对氮素的吸收规律和玉米干物质积累量的变化规律一致，均呈“S”型变化。不施氮处理玉米的吸氮量变化较为平缓，单施速效氮处理在玉米进入生殖生长后地上部吸氮量明显低于配施缓效氮处理，说明单施速效氮肥对玉米生育后期氮素供应不足。配施缓效氮有效增加了玉米生长后期氮素的供应，其中 T_2 供应量较为充足，高于其他处理玉米吸氮量。在玉米吐丝期，T_2 比 T_0 和 T_6 吸氮量分别高 5.22% 和 1.05%。在玉米生理成熟期，各处理吸氮量从大到小分别为 $T_2>T_3>T_5>T_6>T_1>T_4>T_0>CK$，其中 33%缓

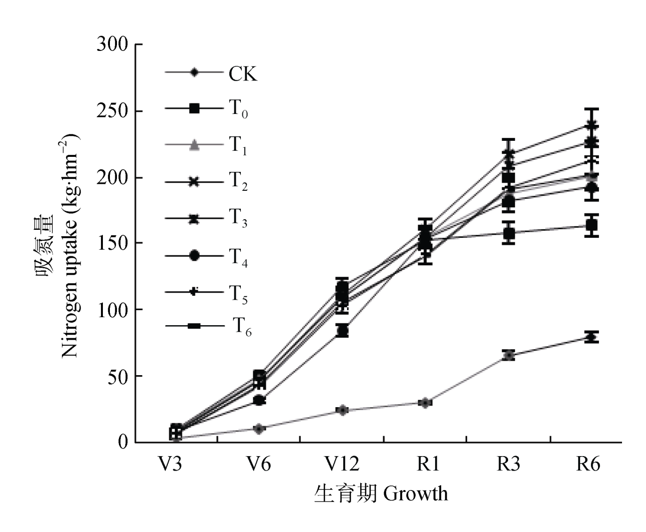


图 2　缓效氮不同添加比例对玉米吸氮量的影响

Fig. 2　Effects of different proportions of slow-release nitrogen in maize specialized nitrogen fertilizer on nitrogen uptake of maize

效氮处理玉米吸氮量分别比 100%速效氮处理和 100%缓效氮处理高 46.64%和 19.12%。

2.4　不同缓效氮添加比例下玉米对氮肥利用的影响

玉米对氮肥的利用通过氮肥利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率来表征。通过表 2 对玉米氮素利用的分析可以看出，不同施肥处理玉米对氮素利用情况不同，添加缓效氮有利于提高玉米对氮素的利用，其中 T_2 处理玉米对氮素的利用最佳。不同施肥处理玉米氮肥利用率从大到小分别为 $T_2>T_3>T_5>T_6>T_1>T_4>T_0$，$T_2$ 处理与 T_0 和 T_6 相比，氮肥利用率分别高 33.89%和 17.10%、氮肥偏生产力分别高 19.66 kg·kg^{-1} 和 16.15 kg·kg^{-1}、氮肥农学效率分别高 19.65 kg·kg^{-1} 和 16.15 kg·kg^{-1}。

表 2　不同缓效氮添加比例对玉米对氮肥利用的影响

Table 2　Effects of different proportions of slow-release nitrogen in maize specialized nitrogen fertilizer on the utilization of nitrogen fertilizer of maize

处理 Treatment	氮肥利用率 Nitrogen use efficiency (%)	氮肥偏生产力 Nitrogen partial productivity (kg·kg^{-1})	氮肥农学效率 Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer (kg·kg^{-1})
T_0	5.90±0.53a	46.54±2.56a	27.38±4.00a
T_1	22.51±1.59a	56.60±0.401ab	37.43±1.14ab
T_2	39.79±0.46a	66.20±2.8b	47.03±3.02b
T_3	34.12±2.18a	59.10±5.82ab	39.93±5.43ab
T_4	18.88±2.48a	52.22±0.625a	33.06±1.57ab
T_5	27.64±1.36a	58.48±2.13ab	39.31±1.8ab
T_6	22.69±1.16a	50.05±0.635a	30.88±2.00a

不同小写字母表示 5%差异显著性。Different lowercase letters mean significant difference at 5%.

2.5　不同缓效氮添加比例对玉米氮素转运的影响

氮素作为玉米产量形成的关键因素，在玉米植株体内的转移能够表征玉米对氮素利用的动态变化。表 3 给出了不同缓效氮添加比例下玉米植株体内各器官氮素转运、营养体氮素转移和氮收获指数的分析结果，可以看出，叶部是玉米氮素转运的主要器官，是籽粒形成的关键氮素转移部位，茎秆氮素的转运少于叶部氮素的转运。就叶部和茎杆而言，添加 T_2 的氮素转运最高，其叶部、茎杆的氮素转运率分别为 76.08%和 49.39%，与其他处理比较差异显著($P<0.05$)，而单施速效氮和单施缓效氮处理的氮素转运较低，由此可见，通过缓效氮和速效氮配施能有效增强生殖生长期玉米营养体的功能持久性，提高氮素在玉米体内的转运，增加对玉米产量形成的贡献。氮素在营养体中的转移表现为添加缓效氮处理高于单一肥料施用处理，其中 T_2 为最高，其氮素转移量、氮转移率和对籽粒贡献率分别为 97.58 kg·hm^{-2}、67.76%和 53.57%。T_2 氮收获指数为 77.40%，为所有处理中最高，并且显著高于肥料单施处理($P<0.05$)。

2.6　收获后土壤硝态氮积累量

土壤硝态氮是石灰性土壤中氮素养分的有效状态，是作物吸收氮素养分的主要形式[33−34]。不同土层硝态氮积累量能够表征该土层氮素养分的供应条件及淋溶状况。通过图 3 对收获后 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 及 60~90 cm 各土层硝态氮积累量的分析可以看出，随着土层深度的增加，土壤硝态氮累积量呈现先降低后增加的变化趋势，T_0 随土层的加深，硝态氮含量逐渐递增；其他处理均表现为 40~60 cm 最低，60~90 cm 最高。配施缓效氮处理在 40~60 cm 和 60~90 cm 土层土壤硝态氮积累量均小于单施速效氮处理，其中以 T_2 积累量最小。

从同一土层角度分析，0~20 cm 和 20~40 cm 土壤硝态氮积累量表现为 T_3 最高，其次为 T_0，T_6 最低，T_2 居中；40~60 cm 和 60~90 cm 土壤硝态氮积累量则表现为 T_0 最高，T_2 含量最低。可见，T_0 底层土壤硝态氮淋失严重，而配施缓效氮能够改善土壤硝态氮含量的分布，降低深层土壤硝态氮的积累量，其中 T_2 各土层硝态氮的含量比较均匀，耕层硝态氮含量既能满足玉米生长对氮素吸收，同时因土壤深层硝态氮淋溶较少，又可有效降低施肥对土壤环境及地下水的污染。

3　讨论与结论

缓效氮和速效氮配合施用既能满足作物生长对

表 3　不同缓效氮添加比例对氮素转运、转移及氮素收获指数等因素的影响

Table 3　Effects of different proportions of slow-release nitrogen in maize specialized nitrogen fertilizer on nitrogen transport, transfer and nitrogen harvest index of maize

处理 Treatment	叶 Leaf			茎秆 Stalk			氮收获指数 Nitrogen harvest index (%)	氮转移量 Nitrogen transfer ($kg\cdot hm^{-2}$)	氮转移率 Nitrogen transfer rate (%)	氮素对籽粒贡献率 Contribution rate of nitrogen to grain (%)
	氮素转运量 Nitrogen transport capacity ($kg\cdot hm^{-2}$)	氮素转运率 Nitrogen transport rate (%)	转运氮的贡献率 Contribution rate of nitrogen transport (%)	氮素转运量 Nitrogen transport capacity ($kg\cdot hm^{-2}$)	氮素转运率 Nitrogen transport rate (%)	转运氮的贡献率 Contribution rate of nitrogen transport (%)				
T_0	33.90±1.51a	58.22±1.43a	29.41±0.18ab	12.48±0.52a	36.53±0.94a	10.87±0.87a	69.87±0.88a	46.39±0.99a	50.22±0.73a	40.28±0.70a
T_1	60.86±0.71c	74.53±0.39b	39.73±1.08c	20.56±1.17bc	48.03±1.83b	13.46±1.28b	76.69±0.28bc	81.42±0.46cd	65.43±0.22bc	53.19±2.36b
T_2	75.45±0.21d	76.08±0.27b	41.46±3.00c	22.14±1.45c	49.39±3.77b	12.11±0.05a	77.40±2.03c	97.58±1.25e	67.76±1.39c	53.57±3.04b
T_3	69.24±3.19cd	75.94±0.28b	43.08±1.08c	15.47±1.19ab	42.03±1.86ab	9.71±1.43a	76.21±1.41bc	84.71±2.00d	66.22±0.19c	52.79±2.51b
T_4	62.71±2.59c	73.93±1.27b	43.72±0.15c	12.21±0.40a	37.30±0.42a	8.52±0.04a	75.76±0.25bc	74.92±2.99c	63.73±1.06bc	52.24±0.11b
T_5	49.92±1.54b	72.81±1.69b	31.15±0.70b	14.96±0.57a	40.79±0.75a	9.37±0.85a	74.61±0.16abc	64.87±0.97b	61.63±0.82b	40.52±1.55a
T_6	30.25±0.68a	57.38±0.62a	22.58±0.20a	14.16±0.80a	39.90±0.41a	10.56±0.45a	71.58±0.36ab	44.41±1.48a	50.35±0.39a	33.14±0.65a

表中不同小写字母表示 5%差异显著性。Different lowercase letters mean significant difference at 5%.

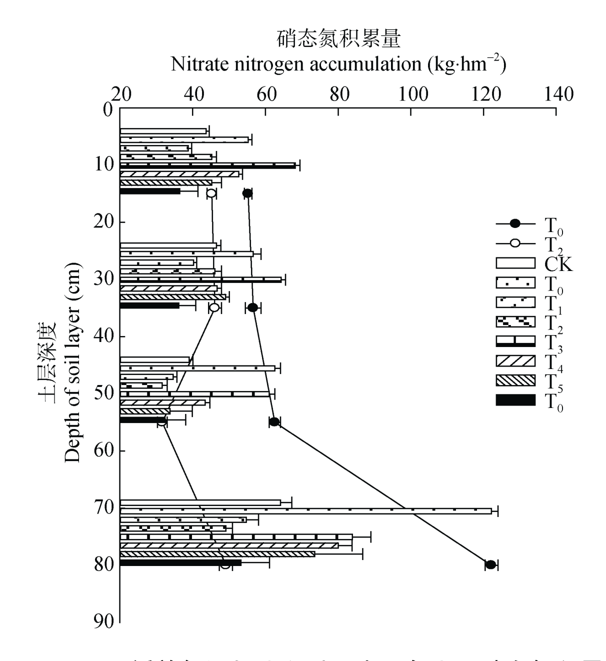


图 3　不同缓效氮添加比利对玉米田各土层硝态氮积累量的影响

Fig. 3　Effects of different proportions of slow-release nitrogen in maize specialized nitrogen fertilizer on the accumulation of nitrate nitrogen in each soil layer of maize field

养分的需求，也能够降低肥料成本，农民易于接受。诸海焘等[35]研究施用缓效肥对玉米生长影响的结果表明，施用缓释肥能够提高玉米产量，改善玉米籽粒的营养品质。王文丽[36]通过一次性底施缓效氮研究发现，缓效氮的养分释放规律和作物对养分的吸收规律相吻合，减少了追肥造成的地膜破坏、劳动力浪费等生产实际问题，并能有效提高肥料利用率，降低生产成本。本研究通过在山西晋北区域轻度盐碱土壤上对玉米氮肥总量控制不变的前提下，在速效氮中添加一定比例缓效氮一次性底施后验证其对玉米生产的影响，结果表明，添加缓效氮肥能够提高玉米产量，改善玉米产量性状，提高玉米对氮素的吸收利用率，促进氮素在玉米体内的转运。作物在盐碱地上生长具有氮肥利用率低等特点[3–4]，诸海焘指出施用缓释肥和常规施肥处理相比缓释肥能够增产 5.95%，氮肥利用率提高 10 个百分点[35]，本文研究结果与之相类似，说明添加缓效氮能有效补给玉米生育后期氮素养分的供给需求，进而促进玉米生长后期对氮的吸收利用。

王激清等[31]通过速效肥和缓效肥配合施用发现，和传统氮肥施用相比，配合施用能提高玉米产量，优化玉米的产量性状，提高氮肥利用率，但针对区域性配方肥中速效成分与缓效成分配比尚不明确。Grattan 等[6]学者研究发现，盐碱地合理施用氮肥，能够有效提高作物产量，本文通过在轻度盐碱地上缓效氮和速效氮配施研究发现，缓效氮添加比例为 33%处理玉米产量最高，玉米成熟期地上部吸氮量最大，氮肥利用率、氮肥偏生产力及氮肥农学效率均最大；缓效氮和速效氮配施能在玉米各生育时期为玉米生长提供不同的氮素供应，33%缓效氮处理既能满足玉米营养生长期正常生长，为群体构建提供充足的养分，又能在玉米生殖生长阶段为籽粒的形成、物质转移过程提供养分。各处理玉米不同器官中氮素转运表现明显不同，均呈现叶片氮素的转运高于茎秆氮素的转运，与 Habash、Moll、Palta 等的结果一致[37–39]，添加缓效氮改善了氮素在玉米各器官的分配状况，增加了生殖生长期间对玉米营养

体氮素养分供应，起到了茎叶保绿、延缓衰老的作用；同时添加缓效氮可提高氮素收获指数和对籽粒的贡献率等指标。本研究随着缓效氮添加比例的增加，各指标呈先增加后减小波动性变化，其中添加33%缓效氮处理为最大波峰处。

王激清等[31]大量学者通过施用缓效肥研究发现，缓效肥的使用能有效减少养分的损失，提高养分利用率，降低养分冗余造成的环境污染等问题[40–43]。本文研究了添加不同比例缓效氮处理对玉米收获后各土层土壤硝态氮积累量变化的影响，得出相类似的结果，即添加缓效氮能有效改善各土层土壤硝态氮的积累，其中 33%缓效氮处理各土层硝态氮的积累量比较均匀，自上而下分别为 45.25 $kg\cdot hm^{-2}$、46.10 $kg\cdot hm^{-2}$、31.63 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 49.13 $kg\cdot hm^{-2}$，说明该配比中氮素养分的释放与玉米根系对氮素养分的吸收相协同，在促进玉米对表层及根层土壤氮素吸收的同时，避免了土壤表层硝态氮残留造成的大气污染和深层土体硝态氮淋失造成的地下水污染。

通过对不同缓效氮添加比例对玉米生产及环境影响的研究发现，玉米生产中速效氮肥和缓效氮肥配合施用，采用一次性施肥方式能有效解放劳动力，其中 33%缓效氮添加比例处理能增加当季玉米产量，提高氮素养分利用率，促进氮素在植株体内的转运，并且能够减少深层土壤中硝态氮的淋溶，改善土壤环境，同时还能最大程度地节约肥料投入成本。因此，建议在山西晋北区域轻度盐碱地春玉米专用肥氮素配方中，以添加 33%缓效氮为最佳。

本文研究环境为轻度盐碱土壤，具有高 pH 和 EC 的特点，植物在盐碱地生长会受到盐胁迫与碱土环境影响[6]。本文选用硫包膜尿素作为缓效氮源，包膜材料硫磺对盐碱地有一定的改良效果，吴曦等[44]研究发现，硫磺能有效降低盐碱地 pH，降低最高为 0.5 个单位。王琦等[24]通过对硫包膜尿素在盐碱土壤中的释放速率的研究发现，硫包膜尿素有降低盐碱土壤 pH 的功效。本文尚未对缓效氮不同添加比例处理下进行玉米各生育期土壤理化性状的分析，今后将对该方向做进一步研究。

参考文献 References

[1] 崔文明，张中东，赵成萍，等. 新型改良剂对盐碱地土壤性质和玉米生长的影响[J]. 山西农业科学：自然科学版，2014, 34(6): 531–534
Cui W M, Zhang Z D, Zhao C P, et al. The effects of a novel soil amendment on the saline alkali soil properties and the growth of maize plants[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2014, 34(6): 531–534

[2] 山西省统计局编. 山西统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社, 2004–2013
Compilation of Shanxi Provincial Bureau of Statistics. Shanxi Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2004–2013

[3] Loveland D G, Ungar I A. The effect of nitrogen fertilization on the production of halophytes in an inland salt marsh[J]. The American Midland Naturalist, 1983, 109(2): 346–354

[4] Drake D R, Ungar I A. Effects of salinity, nitrogen and population density on the survival, growth, and reproduction of *Atriplex triangularis* (Chenopodiaceae)[J]. American Journal of Botany, 1989, 76(8): 1125–1135

[5] 高亮，丁春明，王炳华，等. 生物有机肥在盐碱地上的应用效果及其对玉米的影响[J]. 山西农业科学，2011, 39(1): 47–50
Gao L, Ding C M, Wang B H, et al. Application effects of biological organic fertilizer in saline-alkali soil and its impacts on maize[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2011, 39(1): 47–50

[6] Grattan S R, Grieve C M. Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments[M]// Pessarakli M. Handbook of Plant and Crop Stress. New York: Marcel Decker, 1994: 203–226

[7] 宁建凤，郑青松，刘兆普，等. 外源氮对 NaCl 胁迫下库拉索芦荟生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008, 14(4): 728–733
Ning J F, Zheng Q S, Liu Z P, et al. Effects of supplemental nitrogen on physiological characteristics of *Aloe vera* seedlings under NaCl stress[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 728–733

[8] 原俊凤，田长彦，冯固，等. 硝态氮对盐胁迫下囊果碱蓬幼苗根系生长和耐盐性的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009, 15(4): 953–959
Yuan J F, Tian C Y, Feng G, et al. Effects of nitrate on the root growth and salt tolerance of *Suaeda physophora* seedlings under NaCl stress[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(4): 953–959

[9] Naidoo G, Naidoo Y. Effects of salinity and nitrogen on growth, ion relations and proline accumulation in *Triglochin bulbosa*[J]. Wetlands Ecology and Management, 2001, 9(6): 491–497

[10] 段德玉，刘小京，李存桢，等. N 素营养对 NaCl 胁迫下盐地碱蓬幼苗生长及渗透调节物质变化的影响[J]. 草业学报，2005, 14(1): 63–68
Duan D Y, Liu X J, Li C Z, et al. The effects of nitrogen on the growth and solutes of halophyte *Suaeda salsa* seedlings under the stress of NaCl[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2005, 14(1): 63–68

[11] 于立芝，李东坡，俞守能，等. 缓/控释肥料研究进展[J]. 生物学杂志, 2006, 25(12): 1559–1563
Yu Lizhi, Li Dongpo, Yu Shouneng, et al. Research advances in slow/controlled release fertilizers[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(12): 1559–1563

[12] 樊小林，廖宗文. 控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用

率[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3): 219–223
Fan X L, Liao Z W. Increasing fertilizer use efficiency by means of controlled release fertilizer (CRF) production according to theory and techniques of balanced fertilization[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(3): 219–223

[13] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450–459
Yan X, Jin J Y, He P, et al. Recent advances and prospects on the technology to increase fertilizer use efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(2): 450–459

[14] Martin E T. Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture[R]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997: 15–17

[15] 许秀成, 李菂萍, 王好斌. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告: 第三报包膜(包裹)型控制释放肥料各国研究进展(续)4.中国[J]. 磷肥与复肥, 2001, 16(4): 4–8
Xu X C, Li D P, Wang H B. A special report on coated slow/controlled release fertilizer. Part 3: A review on coated controlled release fertilizer (cont'd)(4) China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2001, 16(4): 4–8

[16] Shaviv A. Plant response and environmental aspects as affected by rate and pattern of nitrogen release from controlled N fertilizers[M]//Van Cleemput O, Hofman G, Vermoesen A. Progress in Nitrogen Cycling Studies. The Netherlands: Springer, 1996: 285–291

[17] Guertal E A. Preplant applications of soluble slow-release nitrogen fertilizers produce similar bell pepper yields as split fertilizer[J]. Agronomy Journal, 2000, 92(2): 388–393

[18] 张夫道, 王玉军. 缓/控释 BB 肥是我国缓/控释肥料的发展方向[J]. 磷肥与复肥, 2009, 24(2): 8–10
Zhang F D, Wang Y J. Slow/controlled release BB fertilizer — The developing direction of China's compound fertilizer[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2009, 24(2): 8–10

[19] Dong Y, Wang Z Y. Release characteristics of different N forms in an uncoated slow/controlled release compound fertilizer[J]. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(3): 330–337

[20] Wu L, Liu M Z. Preparation and properties of chitosan-coated NPK compound fertilizer with controlled-release and water-retention[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 72(2): 240–247

[21] 张海军, 武志杰, 梁文举, 等. 包膜肥料养分控释机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2337–2341
Zhang H J, Wu Z J, Liang W J, et al. Research advances on controlled-release mechanisms of nutrients in coated fertilizers[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2337–2341

[22] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095–1103
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095–1103

[23] Li J Y, Hua Q X, Tan J F, et al. Mineral coated fertilizer effect on nitrogen-use efficiency and yield of wheat[J]. Pedosphere, 2005, 15(4): 526–531

[24] 王琦, 王永亮, 郭军玲, 等. 硫包膜尿素在轻度盐碱土壤中释放特点及肥效研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(2): 182–187
Wang Q, Wang Y L, Guo J L, et al. Release of sulfur coated urea in mild saline-alkali soil and study of its fertilizer efficiency[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(2): 182–187

[25] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924

[26] 胡福亮, 郭德林, 高杰, 等. 种植密度对春玉米干物质、氮素积累与转运及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(6): 60–66
Hu F L, Guo D L, Gao J, et al. Effects of planting densities on dry matter and nitrogen accumulation and grain yield in spring maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(6): 60–66

[27] 霍中洋, 葛鑫, 张洪程, 等. 施氮方式对不同专业小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(5): 449–454
Huo Z Y, Ge X, Zhang H C, et al. Effect of different nitrogen application types on N-absorption and N-utilization rate of specific use cultivars of wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(5): 449–454

[28] 王晓慧, 曹玉军, 魏雯雯, 等. 我国北方 37 个高产春玉米品种干物质生产及氮素利用特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 60–68
Wang X H, Cao Y J, Wei W W, et al. Characteristics of dry matter production and nitrogen use efficiency of 37 spring maize hybrids with high-yielding potential in north of China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 60–68

[29] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 490–496
Jiang L G, Cao W X, Gan X Q, et al. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(4): 490–496

[30] 王敬锋, 刘鹏, 赵秉强, 等. 不同基因型玉米根系特性与氮素吸收利用的差异[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 699–707
Wang J F, Liu P, Zhao B Q, et al. Comparison of root characteristics and nitrogen uptake and use efficiency in different corn genotypes[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(4): 699–707

[31] 王激清, 闫彩云, 韩宝文. 春玉米缓释专用 BB 肥的研制及肥效试验[J]. 河北农业科学, 2011, 15(2): 58–61
Wang J Q, Yan C Y, Han B W. Development of slow release bulk blending fertilizer for spring maize and fertilizer efficiency experiment[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2011, 15(2): 58–61

[32] 陆景陵. 植物营养学(上)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010: 23–27
Lu J L. Plant Nutrition(Ⅰ)[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2010: 23–27

[33] 吕娇, 李淑敏, 潘明阳, 等. 不同包膜控释氮肥对玉米氮素吸收和产量的影响[J]. 天津农业科学, 2012, 18(1): 46–50
Lü J, Li S M, Pan M Y, et al. Effect of different controlled-release N fertilizers on nitrogen absorption and yield of maize[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2012, 18(1): 46–50
[34] 于淑芳, 杨力, 张民, 等. 控释尿素对小麦–玉米产量及土壤氮素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1744–1749
Yu S F, Yang L, Zhang M, et al. Effects of controlled-release urea on wheat-corn's yield and soil nitrogen[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(9): 1744–1749
[35] 诸海焘, 余廷园, 田吉林. 玉米专用缓释复合肥对糯玉米产量和品质的影响[J]. 上海农业学报, 2009, 25(2): 45–48
Zhu H T, Yu T Y, Tian J L. Effects of different slow-release fertilizers on yield and quality of waxy corn[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2009, 25(2): 45–48
[36] 王文丽. 玉米缓释专用肥配方研究[J]. 西北农业学报, 2002, 11(1): 112–114
Wang W L. Study on formula of slow-released special fertilizer for maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2002, 11(1): 112–114
[37] Habash D Z, Bernard S, Schondelmaier J, et al. The genetics of nitrogen use in hexaploid wheat: N utilisation, development and yield[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2007, 114(3): 403–419
[38] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. Agronomy Journal, 1982, 74(3): 562–564
[39] Palta J A, Fillery I R P. N application increases pre-anthesis contribution of dry matter to grain yield in wheat grown on a duplex soil[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(3): 507–518
[40] 粟晓万, 杜建军, 贾振宇, 等. 缓/控释肥的研究应用现状[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 234–238
Su X W, Du J J, Jia Z Y, et al. Progress in the application of slow/controlled release fertilizers[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(12): 234–238
[41] 王宜伦, 李潮海, 王瑾, 等. 缓/控释肥在玉米生产中的应用与展望[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 254–257
Wang Y L, Li C H, Wang J, et al. Application and prospect of slow/controlled release fertilizers in maize production[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 254–257
[42] 丁洪, 王跃思, 秦胜金, 等. 控释肥对土壤氮素反硝化损失和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 1015–1019
Ding H, Wang Y S, Qin S J, et al. Effects of controlled release fertilizers on nitrogen loss by denitrification and N_2O emission[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(5): 1015–1019
[43] 张德奇, 季书勤, 王汉芳, 等. 缓/控释肥的研究应用现状及展望[J]. 耕作与栽培, 2010(3): 46–48
Zhang D Q, Ji S Q, Wang H F, et al. Application and progress in the application of slow/controlled release fertilizers[J]. Tillage and Cultivation, 2010(3): 46–48
[44] 吴曦, 陈明昌, 杨治平. 碱性土壤施硫磺对油菜生长、土壤 pH 和有效磷含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 671–677
Wu X, Chen M C, Yang Z P. Effects of sulfur application on the growth of cole, soil pH and available P in alkaline soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 671–677